



ГЕРВИКОН
HERVICON

• **ЭККОН**
ЕККОН



6 - 9 сентября 2011, СумГУ, г. Сумы, Украина

*XIII Международная научно-техническая конференция "ГЕРВИКОН-2011"
Международный форум "НАСОСЫ-2011"
Семинар "ЭККОН-11"*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕМОНТА КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Бондаренко Г.А.¹, Кармазин В.И.², Стеценко А.А.³, Стеценко О.А.⁴

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты оценки технического состояния центробежных компрессоров производства аммиака по изменению интенсивности основных виброакустических источников и показателей назначения. Предложены этапы создания системы мониторинга и диагностики. Показана возможность оперативной диагностики составных частей компрессорного агрегата и обеспечения его работоспособности при наличии дефекта.

Ключевые слова: компрессор, оценка состояния, диагностика, виброакустические источники.

ВВЕДЕНИЕ

При организации ремонта оборудования в сжатые сроки руководителям предприятия нужна информация о фактическом состоянии оборудования. Они должны своевременно заказать запасные части и в первую очередь

¹ Бондаренко Герман Андреевич, к.т.н., профессор СумГУ, кафедра технической теплофизики, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина.

² Кармазин Владимир Иванович, гл. механик ЗАО «Северодонецкое объединение «Азот», ул. Пивоварова, 5, 93403, г. г. Северодонецк, Луганской обл., Украина.

³ Стеценко Анатолий Анатольевич, гл. научный сотрудник ООО «НТЦ «Диагностика», ул. 40 лет Октября, 69/57, 40031, г. Сумы, Украина, e-mail: Diagnostika@chereda.net.

⁴ Стеценко Олег Анатольевич, директор ООО «НТЦ «Диагностика» », ул. 40 лет Октября, 69/57, 40031, г. Сумы, Украина. Diagnostika@chereda.net.

ремонттировать составные части оборудования, которые имеют наибольший износ и опасные неисправности [1]. Поиск путей повышения эффективности эксплуатации, безопасности и надежности оборудования ведется по многим направлениям и одно из них - усовершенствование методов мониторинга и диагностики [2].

Значительное снижение затрат на техническое обслуживание объектов контроля и повышение эффективности их эксплуатации, снижение рисков на объектах повышенной опасности можно обеспечить путем совершенствования системы мониторинга и диагностики объектов контроля и организации их ремонтов по техническому состоянию, а также путем оптимизации режимов их работы и доработки ненадежных узлов [3 - 5]. Эффективный контроль готовой продукции закрывает доступ к потребителям недоброкачественных изделий, а внедрение в эксплуатацию средств, позволяющих определять достаточно быстро и точно техническое состояние работающих устройств, дает возможность принимать оперативно правильные решения о сроках и содержании профилактических операций и ремонта.

ДСТУ 3161-95 и Системой ТОиР [6 и 7] установлены четыре уровня контроля и оценки технического состояния компрессорного и другого оборудования по вибрационным характеристикам:

а) 1-й уровень – определение общих значений параметров вибрации (виброскорости, вибросмещения и виброускорения) в стандартном частотном диапазоне для экспресс-анализа и определение точек контроля с максимальным их значением, которое сравнивается с нормативным значением, приведенных в ДСТУ 3161 или в других нормативных документах [8];

б) 2-й уровень – определение значений параметров вибрации в определенных полосах частот для оценки изменения интенсивности источников вибрации, которые определяют уровень в анализируемой полосе, и информирования обслуживающего персонала о нарушении нормального функционирования объекта контроля;

в) 3-й уровень – определение значений параметров вибрации в узких полосах частот и сравнение их с базовыми значениями, используются набор масок спектра для оперативного анализа причин изменения вибрации объекта контроля;

г) 4-й уровень – определение интенсивности основных виброакустических источников параметров вибрации для более объективного определения причин изменения их уровня и разработки мероприятий по обеспечению показателей надежности объекта контроля и декларации его безопасности. Для оценки технического состояния дополнительно целесообразно использовать информацию об изменении фазы колебаний оборотных частот и о нестационарности вибрационного процесса (коэффициент эксцесса, пик-

фактор, интегральный и дифференциальный законы распределения, а также, при возможности, полную диагностику гибкого ротора: среднее положение шейки вала относительно вкладышей опорного подшипника, орбита вала, графики полного спектра и др. [9 и 10]).

Результаты обследования и оценки технического состояния компрессорного оборудования производств аммиака приведены в [4 и 11]. В публикации [4] приведены результаты оценки эффективности метода ремонта по фактическому состоянию, а также показан перечень пропуска потенциальных неисправностей компрессоров для первого и четвертого уровней контроля.

1. ЭТАПЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ МАШИН

Для повышения надежности и безопасности машин и оборудования, декларация безопасности производства и снижения риска его эксплуатации до требуемого уровня целесообразно работу подразделить на следующие этапы (задачи решения проблем):

1. Организация оценки технического состояния составных частей машин и обеспечение их ремонта по состоянию (устранение ложных срабатываний системы контроля параметров и пропуска дефектов, а также лишних разборок составных частей машин и замены исправных деталей и узлов) [1, 4, 9, 11 и 12]:

а) организация проведения обследования машин (стандартного, расширенного, специального) и оценки технического состояния их составных частей по 4-му уровню контроля;

б) составление паспортов технического состояния составных частей машин (технологического оборудования, наземной части трубопроводов и строительных конструкций) по нормативным и базовым характеристикам, а также выявление отклонений от нормального функционирования машины по изменениям интенсивности основных виброакустических источников и показателей его назначения, прочности и надежности;

в) разработка программ обеспечения показателей надежности машин по ДСТУ 2863 (рекомендаций по снижению интенсивности вибрации составных частей машин, повышению износостойкости деталей и их прочности, определению и устранению неблагоприятных режимов работы);

г) уточнение значений базовых характеристик, критериев отказа и предельного состояния для каждой модели машины;

д) повышение эффективности стационарной – штатной системы контроля машин путем организации контроля параметров вибрации в информативных

полосах частот и снижения ее стоимости (отказ от дорогого и неэффективного программного обеспечения и разработка его с учетом гармонизированных нормативных документов);

е) улучшение качества ремонта составных частей машин (виброналадка, регламентные работы, освоение технологий завода-изготовителя, внедрение регламентного обслуживания).

2. Создание экспертной системы диагностики технического состояния машин:

а) определение перечня отказов составных частей машин и анализ показателей надежности, уточнение основных технических требований к безопасности и надежности конструкции, норм и методов их контроля, а также определение перечня возможных неисправностей, требуемой полноты их обнаружения и желаемой глубины их поиска (выраженной в терминах конструкторских единиц объекта или в терминах групп, не требующих различения дефектов);

б) разработка решающих правил диагностики для штатной – стационарной системы контроля (при ее наличии) и для оперативной системы оценки технического состояния машин персоналом производств – подразделений предприятия;

в) разработка решающих правил диагностики для полустационарной системы мониторинга и диагностики основных машин и вспомогательного оборудования производства для стандартного, расширенного и специального обследования, после определения необходимой глубины диагноза;

г) совершенствование регламентного обслуживания машин и оборудования (содержание, периодичность, нормы материальных затрат);

3) Декларация безопасности машин и подтверждение показателей безопасности производства:

а) уточнение перечня декларируемых изготовителем показателей безопасности (в соответствии с техническим регламентом Украины), проверка достаточности мероприятий и средств защиты работающих;

б) анализ несчастных случаев на производстве и разработка рекомендаций по их предотвращению;

в) разработка необходимой эксплуатационной и ремонтной документации (в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, норм и правил Украины).

4) Предотвращение возникновения и развития аварийных ситуаций и аварий [10 - 12]:

а) анализ причин возникновения аварийных ситуаций и аварий (неблагоприятные режимы работы машин, несоблюдение нормативов Системы ТООР, ошибки персонала, несовершенная документация и др.);

б) уточнение декларации безопасности и плана предотвращения и локализации аварийных ситуаций и аварий (ПЛАС) объекта повышенной опасности;

в) совершенствование системы управления, контроля и противаварийной защиты объекта контроля (автоматическая подача регулирующего воздействия на объект при возникновении аварийной ситуации и установка дополнительных барьеров защиты).

С 2005 г. ОАО Черкасский «Азот» самостоятельно успешно решает задачи первых двух этапов работы обеспечения безопасной эксплуатации компрессорного оборудования производства аммиака и др., что позволило увеличить их ресурс между капитальными ремонтами более чем в два раза. Другие предприятия для этого привлекают специализированные организации.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА 103 J И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТА

Перед проведением ремонта компрессорного оборудования производства аммиака, которое отработало после последнего капитального ремонта более чем 24 месяца, было проведено диагностическое его обследование (4 июля 2008 г.), оценено техническое состояние его составных частей и определен перечень их неисправностей. Специализированная ремонтная организация практически все выявленные неисправности устранила, кроме одной – обеспечение натяга вкладыша заднего подшипника паровой турбины (была установлена металлическая прокладка между опорной поверхностью вкладыша подшипника и его корпусом, также не были отремонтированы лабиринтные уплотнения турбины и при шлифовке шейки ротора турбины был допущен дефект- волнистость ее поверхности). После этого возникли низкочастотные колебания ротора, и эксплуатировать агрегат с таким дефектом было опасно.

При проведении ремонта была проведена модернизация установки и необходимо было проверить эффективность конструкторско-технологических решений по увеличению ее производительности. Поэтому принято решение вывести агрегат 103 J на полную его нагрузку и, при этом, обеспечить минимально возможный риск с помощью полустационарной системы диагностики [2, 10, 13]. После каждого незначительного изменения режима работы агрегата проводилось его обследование и по его результатам принимались решения о новых параметрах режимах работы, см. таблицу 1, а также ниже приведенные результаты оперативной оценки технического состояния по изменениям узкополосных спектров виброскорости и виброускорения.

Схема компрессорного агрегата 103 J: корпус низкого давления (КНД), паровая турбина, корпус среднего давления (КСД), корпус высокого давления (КВД). Нумерация точек контроля на подшипниках скольжения от свободного конца КНД. Нумерация точек контроля на корпусах компрессора:

В1 – первое рабочее колесо 1-й секции, Н1 – последнее рабочее колесо 1-й секции В2 и Н2 – первое и последнее рабочее колесо 2-й секции.

Краткая характеристика обследований компрессорного агрегата, после его ремонта:

а) обследование 2.1 проводилось 8 октября 2008 г., обследования 2.2 -2.6 проводились 9 октября 2008 г. и обследования 2.7 и 2.8 проводились 10 октября 2008 г.;

б) частота вращения ротора турбины агрегата: обследования 2.1 и 2.2 – 172,5 Гц, обследование 2.3 – 173,3 Гц, обследование 2.4 – 174,2 Гц, обследования 2.5 и 2.6 – 175,0 Гц (увеличили температуру масла с 39°С до 42 °С), обследование 2.7 – 174,75 Гц, обследование 2.8 – 173,3 Гц (максимальная нагрузка по технологическому регламенту).

Таблица 1 – Общие значения виброскорости и виброускорения агрегата 103 J

Точка	Виброскорость, мм/с								
	Обследование								
	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
1В	1.5	0,2	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
1П	4.8	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5
1О	0.5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
2В	0.9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
2П	0.8	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
2О	0.4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6
3В	0.6	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7
3П	1.3	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
3О	0.9	1.6	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2
4В	2.6	2.2	1,9	1,7	1,8	1,7	1,6	1,9	1,7
4П	1.1	1.3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	0,9	0,8
4О	0.9	1.0	0,9	0,8	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7
5В	0.3	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8
5П	0.2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,9	0,9	1,2	1,5
5О	0.3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
6В	0.4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8
6П	0.2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,0
6О	0.2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3
7В	0.2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,6
7П	0.2	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5
7О	0.2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
8В	0.4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8
8П	0.3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
8О	0.2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5

Техническое состояние составных частей компрессорного агрегата 103J по базовым характеристикам имело оценку (ДСТУ 3161):

а) КНД - «Недопустимо» (зона Д):- высокий уровень локальных экстремумов спектра виброускорения в точке контроля (т.к.) 1П (частота 2318,8 Гц или 2356,3 Гц) и В2 (3681,3 Гц),

- повышен уровень на лопаточных основных частотах в т.к. 2В, 2П и 1П. После ремонта интенсивность этого источника виброускорения увеличилась;

- после ремонта уровни на гармониках оборотной частоты в т.к. 1П снизились до приемлемых значений;

б) турбина - «Недопустимо» (зона Д):

- высокий уровень на первой гармонике оборотной частоты в т.к. 4В (обследования 2.1, 2.2 и повышен на всех других обследования агрегата). После ремонта интенсивность этого источника виброускорения снизилась незначительно – неисправность при ремонте не устранили;

- повышен уровень локальных экстремумов спектра виброускорения (частота 98,5 Гц или 100,6 Гц, которая зависит от частоты вращения ротора, ее порядок составляет 0,59 - параметрические колебания, автоколебания имеют порядок 0,3 – 0,48 или происходят на частоте вращения ротора). До ремонта агрегата параметрические низкочастотные колебания отсутствовали. Уровень этих колебаний превышает уровень колебаний на основной оборотной частоте во многих точках контроля агрегата и при определенных его режимах работы (оказывает неблагоприятное влияние на работы других составных частей агрегата и может привести к прочностному отказу, когда их уровень больше уровня колебаний на основной частоте вращения ротора);

- высокий уровень на лопаточных основных частотах в т.к. 3О (обследование 2.1) и повышен в других т.к. при других обследования агрегата. На уровень этого виброакустического источника значительное влияние оказывает режим работы агрегата. После ремонта интенсивность этого источника виброускорения увеличилась;

- высокий уровень сплошного спектра виброускорения в т.к. 4О (обследование 2.6) и повышен этот уровень в других т.к. при других обследования агрегата;

в) КСД и КВД – «Недопустимо» (зона Д):

- высокий уровень локальных экстремумов спектра виброускорения (параметрические колебания, которые возникают из-за неисправности заднего подшипника турбины и износа ее лабиринтных уплотнений);

- высокий уровень локальных экстремумов спектра виброускорения в т.к. В2 проточной части КСД (обследование 2.1, частота 2362, 5 Гц – боковая лопаточная частота КНД);

- повышен уровень на основной лопаточной частоте в т.к. 80 (КВД, обследование 2.8) и в т.к. В1 (1-я секция проточной части КСД).

При обследовании агрегата отклонений показателей режима его работы от требований технологического регламента незафиксировано.

Дополнительная оценка технического состояния составных частей по коэффициенту эксцесса - «Приемлемо». Форма вибросигнала и полигона значительно отличается от характеристик для идеальной машины. По характеристикам вибросигнала можно констатировать то, что при работе агрегата возникает трение в кинематических парах.

Возможные неисправности агрегата, выявленные экспертной программой «Диагностика» и уточненные экспертом:

- повышен вертикальный зазор в подшипнике скольжения ОП4;
- ослабление опоры ОП4;
- резонанс опоры ОП4 и ОП1;
- радиальные касания ротора турбины (шейки ротора турбины в ОП4);
- когерентный срыв потока или резонанс элементов ПЧ КНД;
- неоднородность потока за РК и препятствия потоку в ПЧ КНД;
- кинематическое возбуждение РК и резонанс элементов турбины;
- неоднородность потока за РК и препятствия потоку в ПЧ турбины;
- протечки в ПЧ и вихреобразование в турбине.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ АГРЕГАТА 103J

Компрессорный агрегат 103J длительно эксплуатировать не рекомендуется. При параметрических колебаниях, уровень которых больше уровня колебаний на частоте вращения ротора, возможны прочностные отказы. Эти колебания в турбине способствуют возникновению и развитию вторичных дефектов турбины, а также других составных частях агрегата. При уровне параметрических колебаний ниже уровня на оборотной частоте агрегаты иногда работают длительное время, но это редкое явление и поэтому о нем мало опубликовано информации.

До проведения ремонта турбины агрегата необходимо с помощью переносных технических средств контроля вибрации – анализатора - следить за развитием выявленных неисправностей и возникновением вторичных дефектов. Штатная стационарная система контроля общих уровней вибросмещения роторов агрегата не позволяет выявить и следить за развитием таких неисправностей, а также за состоянием проточной части компрессора и турбины. Необходимо контролировать уровень параметрических колебаний, а также уровень субгармонических колебаний и автоколебаний, рост числа гармоник оборотной частоты и уровень виброускорения (на основных и боковых лопаточных частотах). По ДСТУ

3161 не допускается работа агрегата: при уровне низкочастотных колебаний (субгармоник) более 0,5 мм/с, при резком изменении значения виброскорости – более чем на 1 мм/с и при постепенном изменении ее значения за несколько суток более чем на 3 мм/с. Также рекомендуется контролировать резкое изменение виброускорения при установившемся режиме работы агрегата (опасно увеличение уровня - возникновение дефекта, а также резкое его снижение - предвестник прочностного отказа).

При эксплуатации агрегата необходимо плавно изменять режим работы агрегата (не допускать быстрого изменения частоты вращения ротора, мощности, давления и температуры сжимаемой среды компрессора и пара турбины).

При ремонте заднего подшипника турбины, прежде всего, рекомендуется проверить и устранить износ нижней части корпуса подшипника (ось вала турбины не должна быть смещена вниз от проектных значений), а также более качественно обеспечить прилегание вкладышей к постелям, требуемые Изготовителем зазоры и натяги. Для устранения низкочастотных колебаний целесообразно отремонтировать лабиринтные уплотнения турбины.

ВЫВОДЫ

1. Внедрение более совершенной системы мониторинга и диагностики компрессорного оборудования позволяет не только повысить его безопасность и снизить риски эксплуатации опасных производств, но и получить существенный экономический эффект при переходе на ремонт оборудования по техническому состоянию. Для этого в Украине разработано, на современном уровне, практически все необходимое (нормативные документы, методики комплексного обследования, система технического обслуживания и ремонта, технические средства измерения и программное обеспечение).

2. Работу по повышению надежности и безопасности машин и оборудования предложено подразделить на четыре этапа – основные задачи решения проблемы предприятия.

3. Разработаны отечественные технические средства для системы вибрационного мониторинга и диагностики, технические характеристики которых не уступают зарубежным аналогам и с которым работает экспертное программное обеспечение НТЦ «Диагностика». Впервые на рынке СНГ ИТЦ «Вибродиагностика» предложен двух- и четырехканальный регистратор сигналов, который существенно расширил возможности экспертной диагностики технического состояния машин.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Репин В.Н., Стеценко А.А., Стеценко О.А. Опасности насосного и компрессорного оборудования // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2007, № 3 (10) - С. 37-45.
2. Стеценко А.А., Бедрий О.И., Долгов Е.А., Стеценко О.А. Система обеспечения надежности и безопасности компрессорного оборудования // Труды XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2004. – Том III. - С. 54 – 64.
3. Стеценко А.А., Бедрий О.И., Стеценко О.А. Совершенствование контроля и оценки технического состояния турбомашин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2008, № 1 (12) – С. 13-30.
4. А.А. Стеценко, С.А. Стеценко Подтверждение декларации безопасности насосного и компрессорного оборудования // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2009, №1 - С.49-56.
5. Стеценко А.А., Бедрий О.И., Долгов Е.А., Стеценко О.А. Программа для экспертной диагностики машин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2007, №1– С. 20-29.
6. ДСТУ 3161-95 Компрессорное оборудование. Определение вибрационных характеристик центробежных компрессоров и нормы вибрации.
7. Система технического обслуживания и ремонта технологического и теплоэнергетического оборудования химических предприятий Министерства промышленной политики Украины (Система ТОиР). – К.: ОАО «Укртеххимпром», 1998. - 432 с.
8. Стеценко А.А., О.А. Стеценко О.А. Стандартизация в области вибрации, контроля технического состояния, диагностики и прогнозирования ресурса промышленных машин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2006, №2 - С. 34-43.
9. Стеценко А.А., Бедрий О.И., Стеценко О.А. Метод диагностики НТЦ «Диагностика» // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2006, №3 - С. 22-35.
10. Кармазин В.И., Сушильников Ю.Л., А.А. Стеценко, О.А. Стеценко Низкочастотные колебания в турбомашинах // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2009, №4 - С.11-19, 2 и 3 обложки журнала.
11. Стеценко А.А., Анищенко Б.В., Бедрий О.И., Стеценко О. А. Диагностика насосного и компрессорного оборудования и прогнозирование остаточного его ресурса // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Герметичность, виброненадежность насосного и компрессорного оборудования - ГЕРВИКОН-2005» - Сумы, СумГУ, 2005 г. – Том 3. С. 230 – 241.
12. Мамонов А.И., Рудко В.В. Стеценко А.А., Стеценко О.А. Оценка технического состояния составных частей ГПА- 25И по вибрационным характеристикам и декларация его безопасности – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2009, № 2 – С. 25-33.

13. Стеценко А.А., Бедрий О.И., Долгов Е.А., Стеценко О.А. Программное обеспечение для стандартной оценки технического состояния машин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита – Донецк, ДонГНУ, Ассоциация механиков, 2006, №4 (7)– С.30-40.